第40卷 第9期
2023年9月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 9
Sep. 2023

保护性耕作对黄土高原旱作麦田土壤氮矿化的影响

庞 晔， 袁建钰， 闫丽娟， 杜梦寅， 李 广

（甘肃农业大学林学院，甘肃 兰州 730070）

摘 要： 农田土壤氮矿化是陆地生态系统氮循环的重要过程，对维持土壤供氮能力及作物生长发育具有重要意义。陇中黄土高原半干旱区是我国西北部重要的粮食生产区，如何实现当地旱作农田氮素高效利用一直是研究热点，然而目前关于该地区不同耕作措施对旱作麦田土壤氮矿化的影响规律我们却知之甚少。为此本文以黄土高原旱作麦田为研究对象，于2021年春小麦生育期（3—8月）采用树脂芯原位培养法监测不同耕作措施[传统耕作（T）、免耕（NT）、传统耕作+秸秆覆盖（TS）、免耕+秸秆覆盖（NTS）]对土壤氮矿化的影响特征，通过分析不同耕作措施对土壤氮素含量和水热条件的影响规律，以此来探究耕作措施对土壤氮矿化过程的影响。结果表明：（1）T、NT、TS和NTS处理下土壤氮素在春小麦生育前期（播前-开花期）呈净氮固持状态、中后期（开花期-成熟期）呈净氮矿化状态。不同耕作措施下土壤净氮矿化速率差异显著（$P<0.05$），呈现为NTS>TS>NT>T。（2）相较T处理，3种保护性耕作在春小麦生育期内增加了土壤全氮、NH_4^+-N含量和土壤水分，减少了NO_3^--N含量和土壤温度的累积。（3）相关分析表明，土壤氮素含量、土壤水热是影响土壤净氮矿化速率的关键要素，但不同培养阶段调控土壤氮矿化的影响因子有所不同。综上所述，NTS处理有利于土壤氮矿化，提高了农田土壤氮素供应和蓄水保墒能力，对维持和恢复黄土高原半干旱区农田系统生产力具有重要意义。

关键词： 春小麦地；保护性耕作；土壤氮矿化；土壤氮组分；土壤水热

农田土壤作为陆地生态系统中物质循环的重要组成部分，其土壤养分含量的高低及稳定性对生物地球化学循环和全球气候变化有直接影响[1]。近年来，由于农业生产资源利用匮乏及其与生态环境间的矛盾越发紧张，农田土壤生态系统氮循环过程成为当前研究热点[2]。氮素作为合成植物体内酶、氨基酸等物质的元素之一，对于植物体物质积累和分配有至关重要的作用[3]。已有研究表明土壤氮素对促进植物生长发育、提升作物产量和品质、调控农田生产力[4]有重要意义。但以有机态氮的形式大量存在的土壤氮素不能被植物直接吸收，只能通过一系列的生物化学反应将有机氮转化为无机态氮，即有机态氮通过矿化作用成为植物有效氮[5]。研究土壤氮矿化，对于理解农田土壤肥力状况及生产力水平、影响农田土壤生态系统稳定性具有重要作用[6]。但由于土壤温度、土壤质地、pH、含水量、耕作制度、微生物活性及群落组成、施肥管理及土地利用方式等诸多因素影响[7]，土壤氮矿化过程存在着众多不确定性。

耕作是改变土壤理化性质和生物学特性的直接途径，影响着农田土壤生态系统养分循环[8]。黄土高原半干旱区由于其特殊的地理环境和地域特征，导致该区域土质疏松，植被稀疏，水土流失严重，农田土壤生态系统脆弱[9]。因此，为保护和修复该区域农田土壤生态环境与生态效应，在农业生产中进行合理的耕作措施对农田生态系统健康和农业可持续发展至关重要。保护性耕作作为现代农业生产中的重要举措之一，可有效减少土壤流失与侵蚀、改善土壤物理结构稳定性、提高土壤蓄水保墒效益、增加土壤养分供应能力以及协调发展生

收稿日期： 2023-04-18； **修订日期：** 2023-07-14

基金项目： 国家自然科学基金（32360438）；甘肃省重点研发项目（22YF7FA116）；甘肃省优秀博士生项目（22JR5RA843）；甘肃省优秀研究生“创新之星”项目（2022CXZX-641）

作者简介： 庞晔（2000-），男，硕士研究生，主要从事农地土壤氮循环研究. E-mail: 3058355336@qq.com

通讯作者： 李广. E-mail: lig@gsau.edu.cn

态、社会效益[10]。吴鸿宇[11]对东北黑土氮矿化特性的研究发现,免耕增加了土壤有机质含量和水分,使得土壤净氮矿化速率加快,提高了土壤氮素转化过程。邓超超等[12]对旱农区麦豆轮作系统的研究发现,免耕可以影响微生物生物量及细菌群落结构,进而提高土壤氮矿化速率。李文慧等[13]对覆盖土壤氨化年变化的研究发现,秸秆覆盖能够促进土壤氨化细菌增加,从而提高土壤氮矿化能力。综上所述,不同耕作方式对土壤物理结构和养分含量的影响存在差异,间接导致土壤氮矿化过程发生改变。然而自然条件下土壤有机氮矿化具有明显的时空变化特征,但目前关于陇中黄土高原地区春小麦生育期内耕作措施与土壤氮矿化特征之间关系的研究还较少,土壤氮素矿化过程在该区域随春小麦生长发育的时空变化特征尚不明确,亟待进一步验证。

陇中黄土高原半干旱区作为我国西北部重要的粮食生产区,其土壤生态系统氮转化过程对维持区域氮库稳定和农业生产具有重要意义。然而,该地区由于连续多年不合理农耕措施使得土壤结构频繁遭到破坏,土壤质量降低、生态环境日益恶化、土壤理化性质等发生改变,对区域土壤氮矿化过程造成巨大影响。虽然近年来关于陇中黄土高原地区农田土壤氮矿化特征已有一定的研究[14],但多限于室内培养条件[15],室内培养氮矿化与田间实际情况有明显出入,并不能准确反映农田土壤氮素真实转化规律,而树脂芯原位培养法能较好地反映自然生态系统中实际氮矿化速率[16]。基于以往研究不足及研究方法存在局限性,本研究以陇中黄土高原旱作麦田土壤为研究对象,通过春小麦生育期不同培养阶段下野外树脂芯原位培养观测,研究不同耕作措施下旱作麦田土壤氮矿化的动态变化特征,为深入理解陇中黄土高原地区农田土壤生态系统养分循环及促进农业生产可持续发展具有重要意义。

1　研究区概况与方法

1.1　研究区概况

研究区位于甘肃省定西市安定区安家坡村(35°64′N,104°64′E)水土保持科学研究所试验站,平均海拔2000 m,年平均气温7.2 ℃,年均无霜期为140 d,年均蒸发量为1531 mm,年均降水量377 mm,年均日照时长约2083 h,属典型的温带大陆性气候带。研究区土壤主要为次生黄土母质发育形成的黄绵土,土壤质地绵软均匀。试验前土壤耕层pH为8.36,土壤全氮为0.61 $g\cdot kg^{-1}$,全磷0.32 $g\cdot kg^{-1}$,容重1.19 $g\cdot cm^{-3}$,有机碳6.21 $g\cdot kg^{-1}$。2021年月均温度及月均降水量如图1所示。

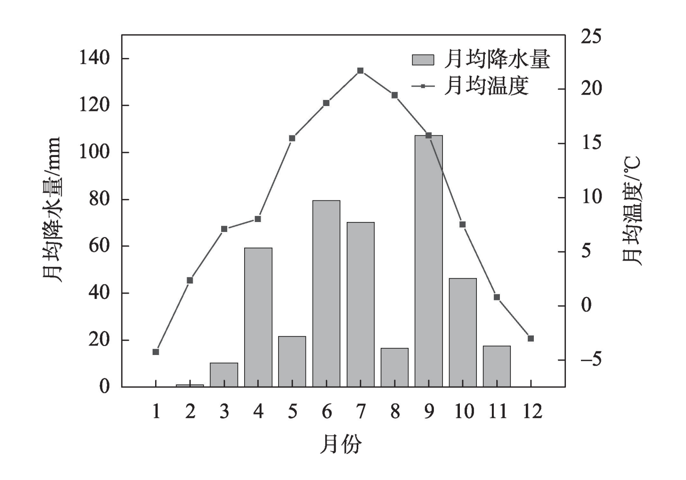


图1　2021年试验区月均温度和月均降水量

Fig. 1　Monthly average temperature and monthly average precipitation in the test area in 2021

1.2　试验设计

1.2.1　保护性耕作试验设计　保护性耕作试验样地布设于2016年,已持续监测5 a,土壤氮矿化试验于2021年在春小麦生育期内进行。选择当地常种春小麦“甘春35号”为供试品种。试验共布设4种耕作措施:以传统耕作(T)为对照,布置免耕(NT)、传统耕作+秸秆覆盖(TS)、免耕+秸秆覆盖(NTS)等3种保护性耕作措施(表1)。各处理均设置3个重复,共计12块固定样地,样地面积为24 m^2(4 m×6 m),样地春小麦播种量为187.5 $kg\cdot hm^{-1}$,种植间距为25 cm,种植深度为7 cm,试验地基肥为尿素(含N 46%)62.5 $kg\cdot hm^{-2}$和过磷酸钙(含P 16%)150 kg·

表1　不同耕作措施样地基本特征

Tab. 1　Basic characteristics of plots with different farming methods

处理	耕作方式
传统耕作(T)	按照当地农业生产经验,实施传统的三耕两耱
免耕(NT)	全年农业生产期间不翻耕土地,采用免耕机进行播种和施肥
传统耕作+秸秆覆盖(TS)	耕作方式同传统耕作,收获后将春小麦秸秆切碎均匀覆盖于还田小区内,秸秆覆盖量为4000 $kg\cdot hm^{-2}$
免耕+秸秆覆盖(NTS)	耕作方式同免耕,收获后将春小麦秸秆切碎均匀覆盖于还田小区内,秸秆覆盖量为4000 $kg\cdot hm^{-2}$

hm^{-2}。各样地小区间间距设置为0.5 m宽的隔离带，避免样地之间相互影响。

1.2.2 *原位矿化试验设计* 本试验中以树脂芯原位培养法进行测定0~20 cm土层土壤氮素矿化过程。于2021年3月15日春小麦播种日在各试验样地统一布设原位矿化装置，测定土壤氮素矿化过程。树脂芯原位矿化装置包括PVC管（直径Φ 8 cm×高度H 20 cm×厚度δ 2 mm），滤纸、装有3 g阴离子交换树脂尼龙袋的树脂垫和石膏塞。根据春小麦生长状况，分别于播前-分蘖期、分蘖期-拔节期、拔节期-开花期、开花期-灌浆期、灌浆期-成熟期5个培养阶段进行原位培养试验。树脂芯原位培养法对土壤干扰较小，且培养管中土壤水热条件与周边土壤变化能够保持一致，能有效避免土芯中矿质氮的积累对氮矿化结果造成影响，试验数据更接近自然环境条件下土壤有机氮矿化结果。

1.3 样品采集及分析

于春小麦播种日在每个试验小区内随机选取3个点，各打入1支PVC管，之后将PVC管取出，剥离其底部约2 cm的土壤，依次将滤纸、树脂垫、滤纸和石膏塞置于PVC管土柱底部，并用带孔的聚乙烯薄膜覆盖其顶部，以防止氮沉降，然后将准备好的原状土柱埋入原处进行培养，在土柱附近用土钻取0~20 cm土层土样3次，混匀过2 mm筛，装入自封保鲜袋，用具生物冰袋保温箱带回实验室测定土壤净氮矿化初始值和土壤含水量；之后每隔一个培养阶段取出原状土柱，并在附近埋设新管培养，带回的土柱当天即进行土壤和阴离子交换树脂内矿质氮的提取，测定管内土壤含水量。

采用MgO-戴氏合金蒸馏法测定土壤NH_4^+-N和NO_3^--N含量，土壤样品经过浓H_2SO_4-H_2O_2消煮、采用凯氏定氮法测定土壤全氮含量；树脂垫采用2 $mol\cdot L^{-1}$KCl浸提法，之后测定矿质氮含量，土壤含水量采用铝盒烘干法测定，土壤温度采用EM50进行长期监测[17]。

1.4 数据计算与分析

根据培养前后铵态氮和硝态氮含量的差值计算土壤氨化速率、硝化速率和净氮矿化速率，计算公式如下[16]：

$$A_{Sar}=(N_{B铵}+N_{E铵}-N_{A铵})/\Delta t \quad (1)$$

$$N_{Snr}=(N_{B硝}+N_{E硝}-N_{A硝})/\Delta t \quad (2)$$

$$T_{Smr}=[(N_{B铵}+N_{B硝}+N_{E铵}+N_{E硝})-(N_{A铵}+N_{A硝})]/\Delta t \quad (3)$$

式中：A_{Sar}表示土壤净铵化速率（$mg\cdot kg^{-1}\cdot d^{-1}$）；$N_{B铵}$表示培养后的$NH_4^+$-N含量（$mg\cdot kg^{-1}$）；$N_{E铵}$表示树脂袋吸附$NH_4^+$-N含量（$mg\cdot kg^{-1}$）；$N_{A铵}$表示培养前的$NH_4^+$-N含量（$mg\cdot kg^{-1}$）；$N_{Snr}$表示土壤净硝化速率（$mg\cdot kg^{-1}\cdot d^{-1}$）；$N_{B硝}$表示培养后的$NO_3^-$-N含量（$mg\cdot kg^{-1}$）；$N_{E硝}$表示树脂袋吸附$NO_3^-$-N含量（$mg\cdot kg^{-1}$）；$N_{A硝}$表示培养前的$NO_3^-$-N含量（$mg\cdot kg^{-1}$）；$T_{Smr}$表示土壤净氮矿化速率（$mg\cdot kg^{-1}\cdot d^{-1}$）；$\Delta t$表示培养时间。

使用Microsoft Excel 2010处理试验数据，SPSS 20.0软件进行统计分析，Origin 2021制图。运用单因素方差分析（One-way ANOVA）比较春小麦生育期内观测指标的差异显著性（α=0.05）。采用线性回归分析探讨氮素含量，水热因子与氮矿化之间的相关性，显著性水平为P<0.05，置信区间为95.0%。利用灰色关联度分析土壤净氮矿化速率与氮素含量及水热因子间的关联关系，多元逐步回归分析拟合不同阶段土壤净氮矿化速率与氮素含量、水热因子间最佳模型，模型评价指标采用调整后的R^2评价。

2 结果与分析

2.1 不同耕作措施对春小麦土壤氮矿化量及氮矿化速率的影响

2.1.1 *不同耕作措施对春小麦土壤氮矿化量的影响* 由表2可知，各处理下的土壤氮矿化量差异显著（P < 0.05）。随着生育期的进行，各耕作措施处理下土壤净氨化量、土壤净硝化量和土壤净氮矿化量均呈前期减少、中后期增加的趋势。春小麦全生育期内土壤净氮矿化量变化范围为-11.81~20.60 $mg\cdot kg^{-1}$，其中最大值出现在NTS处理下（-8.01~20.60 $mg\cdot kg^{-1}$），最小值出现在T处理下（-11.81~17.07 $mg\cdot kg^{-1}$），净氮矿化量表现为NTS（33.64 $mg\cdot kg^{-1}$）>TS（22.06 $mg\cdot kg^{-1}$）>NT（13.59 $mg\cdot kg^{-1}$）>T（6.95 $mg\cdot kg^{-1}$）。

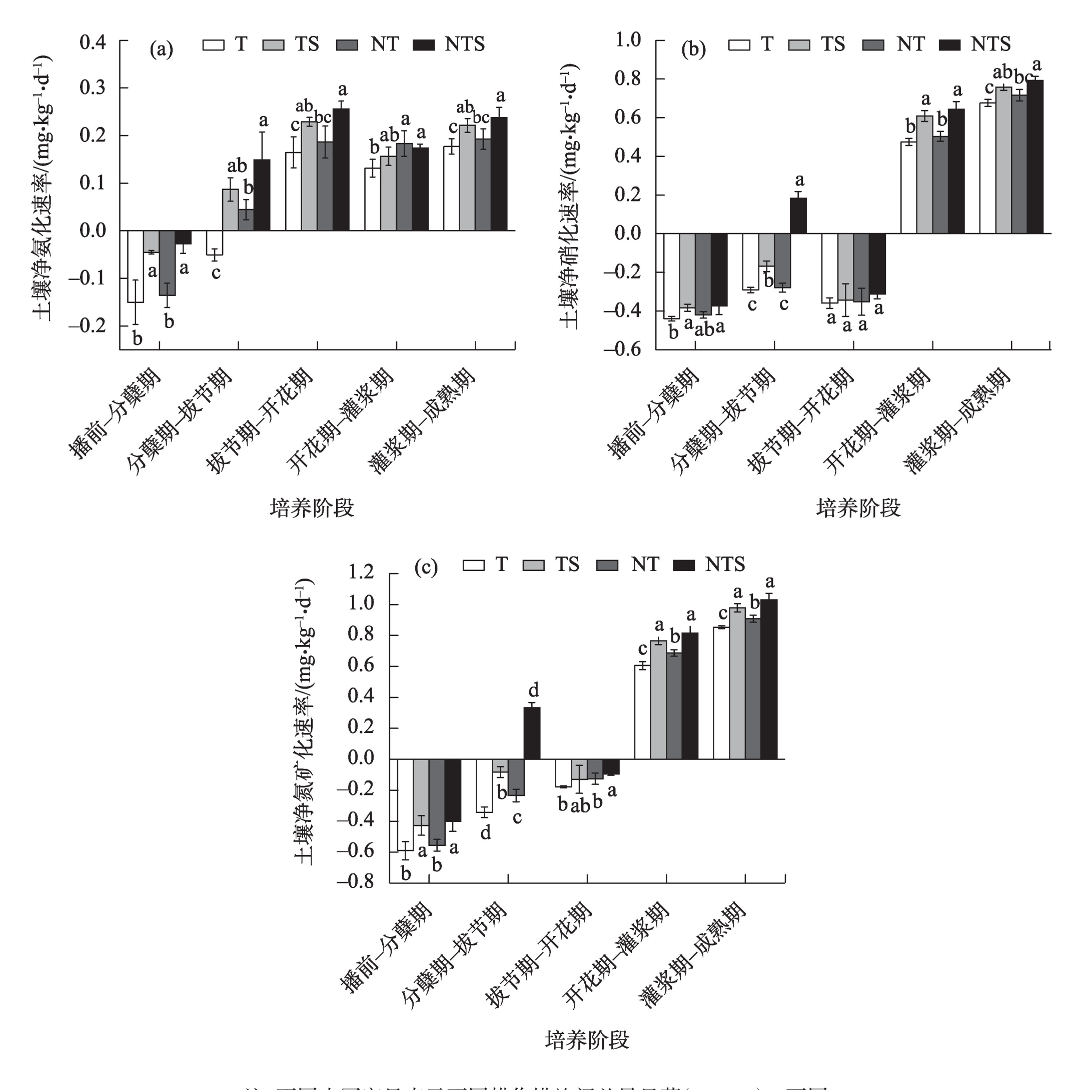
2.1.2 *不同耕作措施对春小麦土壤氮矿化速率的影响* 如图2a所示，土壤净氨化速率具有明显的季节动态变化特征，呈逐渐增加并在灌浆期-成熟期达到峰值的变化趋势。春小麦全生育期土壤氨化速率表现为NTS（0.788 $mg\cdot kg^{-1}\cdot d^{-1}$）>TS（0.648 $mg\cdot kg^{-1}\cdot d^{-1}$）>NT（0.471 $mg\cdot kg^{-1}\cdot d^{-1}$）>T（0.271 $mg\cdot kg^{-1}\cdot d^{-1}$）。

表2　不同耕作措施处理下春小麦各培养阶段土壤氮矿化量

Tab. 2　Soil nitrogen mineralization at different growth stages of spring wheat

指标	处理	播前–分蘖期	分蘖期–拔节期	拔节期–开花期	开花期–灌浆期	灌浆期–成熟期	全生育期
土壤净氨化量/(mg·kg⁻¹)	T	−3.01b	−1.02c	3.29c	2.63b	3.54c	5.43d
	TS	−0.91a	1.73ab	4.58ab	3.13ab	4.42ab	12.95b
	NT	−2.71b	0.89b	3.73bc	3.66a	3.85bc	9.42c
	NTS	−0.55a	2.98a	5.11a	3.47a	4.75a	15.77a
土壤净硝化量/(mg·kg⁻¹)	T	−8.80b	−5.83c	−7.18a	9.47b	13.53c	1.20c
	TS	−7.66a	−3.38b	−6.86a	12.17a	15.14ab	9.43b
	NT	−8.40ab	−5.58c	−7.03a	10.07b	14.32bc	3.38c
	NTS	−7.46a	3.67a	−6.24a	12.85a	15.85a	18.66a
土壤净氮矿化量/(mg·kg⁻¹)	T	−11.81b	−6.85d	−3.57b	12.10c	17.07c	6.95d
	TS	−8.56a	−1.65b	−2.60ab	15.30a	19.57a	22.06b
	NT	−11.12b	−4.69c	−2.51b	13.73b	18.17b	13.59c
	NTS	−8.01a	6.65a	−1.92a	16.32a	20.60a	33.64a

注:同列数据后不同的小写字母表示不同耕作措施间差异显著(P<0.05)。



注:不同小写字母表示不同耕作措施间差异显著(P<0.05)。下同。

图2　不同耕作措施处理下春小麦各培养阶段土壤氮矿化速率变化特征

Fig. 2　Characteristics of soil nitrogen mineralization rate at different growth stages of spring wheat

如图2b所示，土壤净硝化速率具有明显的季节动态变化特征，呈逐渐增加并在灌浆期–成熟期达到峰值的变化趋势。春小麦全生育期土壤净硝化速率表现为NTS(0.933 mg·kg⁻¹·d⁻¹)>TS(0.471 mg·kg⁻¹·d⁻¹)>NT(0.169 mg·kg⁻¹·d⁻¹)>T(0.060 mg·kg⁻¹·d⁻¹)。

如图2c所示，春小麦生育期内土壤净氮矿化速率与土壤净硝化速率变化特征相似，呈现前期降低，后期逐渐增加并达到峰值的变化规律。春小麦生育期不同处理间土壤净氮矿化速率差异显著($P<0.05$)，表现为NTS(1.682 mg·kg⁻¹·d⁻¹)>TS(1.103 mg·kg⁻¹·d⁻¹)>NT(0.680 mg·kg⁻¹·d⁻¹)>T(0.347 mg·kg⁻¹·d⁻¹)。

2.2 不同耕作措施对春小麦土壤氮组分的影响

如图3所示，各处理下土壤全氮和铵态氮含量显著差异($P<0.05$)(图3a，图3b)。随春小麦生育期的推进，各耕作措施处理下土壤全氮和铵态氮含量均呈先减后增的变化规律，春小麦全生育期内土壤全氮含量表现为NTS(0.656 g·kg⁻¹)>TS(0.630 g·kg⁻¹)>NT(0.610 g·kg⁻¹)>T(0.599 g·kg⁻¹)，土壤铵态氮含量表现为：NTS(10.550 mg·kg⁻¹)>TS(9.981 mg·kg⁻¹)>NT(9.069 mg·kg⁻¹)>T(8.665 mg·kg⁻¹)。

各处理下土壤硝态氮含量显著差异($P<0.05$)(图3c)。随春小麦生育期的推进，各耕作措施处理下土壤硝态氮含量均呈先增后减再增的变化规律，春小麦全生育期土壤硝态氮含量表现为：T(26.432 mg·kg⁻¹)>NT(24.903 mg·kg⁻¹)>TS(22.370 mg·kg⁻¹)>NTS(21.767 mg·kg⁻¹)。

2.3 不同耕作措施对春小麦土壤水热条件的影响

由图4a可知，土壤含水量在春小麦生育期表现为"W"型动态变化趋势。相较T处理，NTS、TS和NT

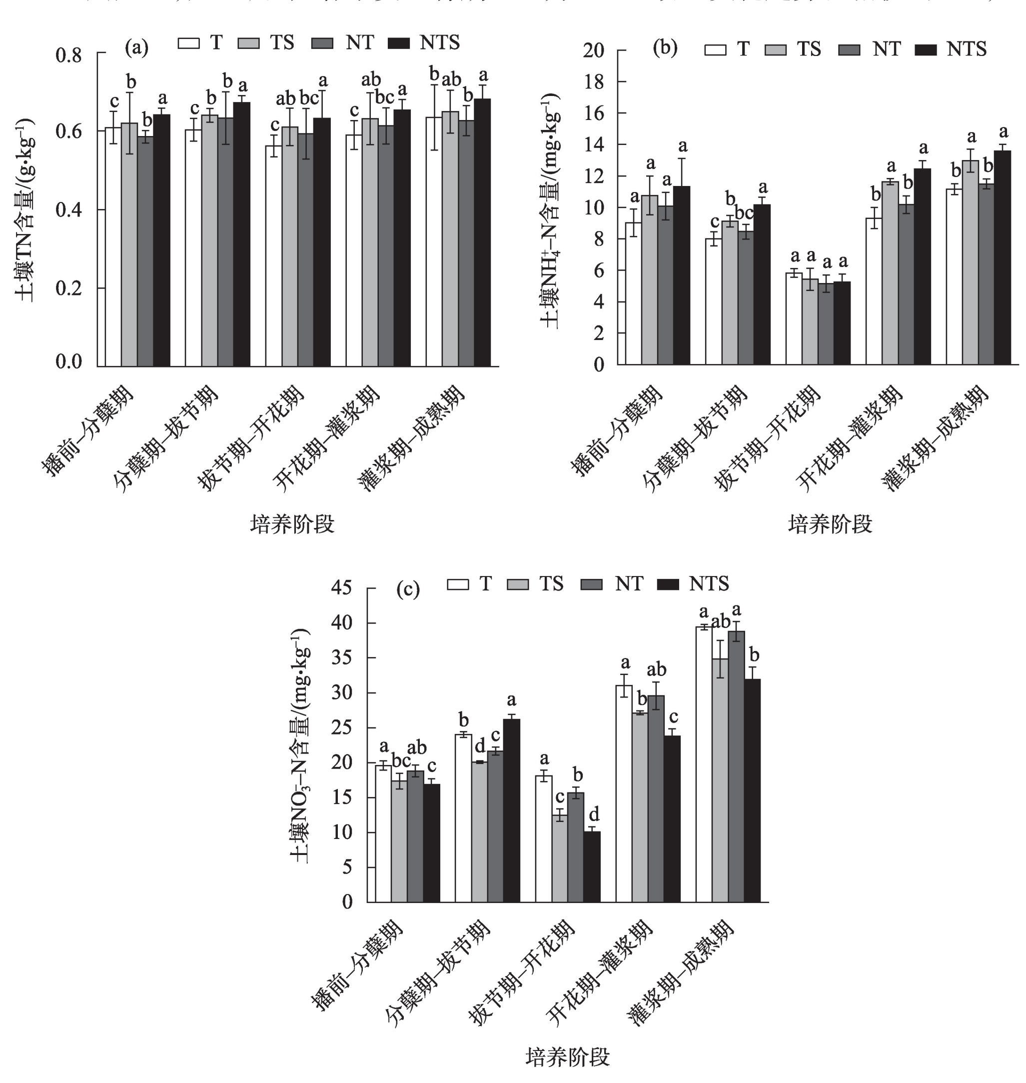


图3 不同耕作措施处理下春小麦各培养阶段土壤氮组分变化特征

Fig. 3 Variation characteristics of soil nitrogen components in different growth stages of spring wheat field under different tillage treatments

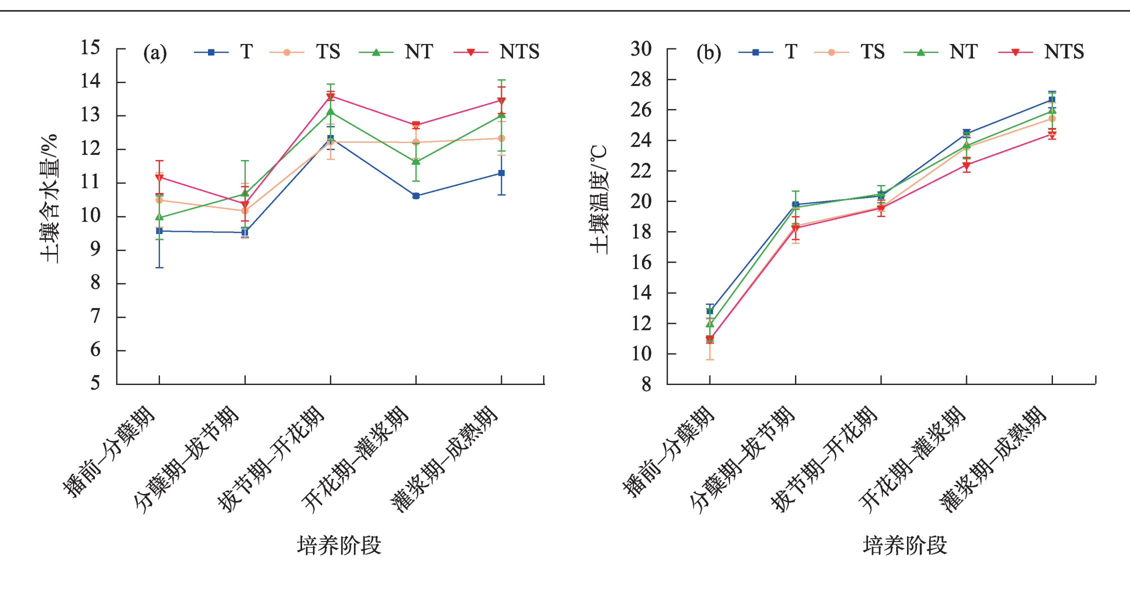


图4　不同耕作处理下春小麦各培养阶段土壤水热条件变化特征

Fig. 4　Characteristics of soil water and heat changes at different growth stages of spring wheat field under different tillage treatments

处理下土壤含水量分别升高了13.05%、7.12%、8.64%,春小麦生育期内土壤含水量差异显著(P<0.05),表现为NTS(12.27%)>NT(11.67%)>TS(11.48%)>T(10.66%)。

如图4b所示,各处理下土壤温度差异显著(P<0.05)。各耕作措施处理下土壤温度随生育期推进均呈逐渐上升的趋势。春小麦全生育期内土壤温度波动范围为10.95~26.7 ℃,表现为T(20.8 ℃)>NT(20.3 ℃)>TS(19.6 ℃)>NTS(19.1℃)。

2.4　土壤净氮矿化速率与土壤氮组分、土壤温度和土壤含水量之间的关系

为探究土壤净氮矿化速率与土壤氮含量及土壤水热条件之间的相关关系,将土壤净氮矿化速率作为控制变量进行线性拟合分析(图5)。结果表明,春小麦全生育期内,土壤净氮矿化速率与土壤全氮含量之间呈显著正相关(P<0.05),R^2为0.047,土壤净氮矿化速率与土壤NH_4^+-N含量、NO_3^--N含量、土壤温度和土壤含水量之间呈极显著正相关(P<0.01),R^2依次为0.320、0.630、0.732和0.223。

由表3可知,春小麦全生育期内土壤净氮矿化速率与土壤温度、土壤含水量、土壤铵态氮、土壤硝态氮和土壤全氮之间有较强的关联强度关系(0.6<关联度≤0.8),但不同培养阶段关联强度有区别。

为进一步探讨春小麦不同生育期下土壤净氮矿化速率与土壤氮素及水热条件的关系,利用多元逐步回归方程分析检验选出最优模型:

播种前-分蘖期: $y=0.356+0.315x_2$; $(R^2=0.195,\ P<0.05)$　(4)

分蘖期-拔节期: $y=-0.463-0.829x_1+0.168x_3+0.231x_4$; $(R^2=0.660,\ P<0.05)$　(5)

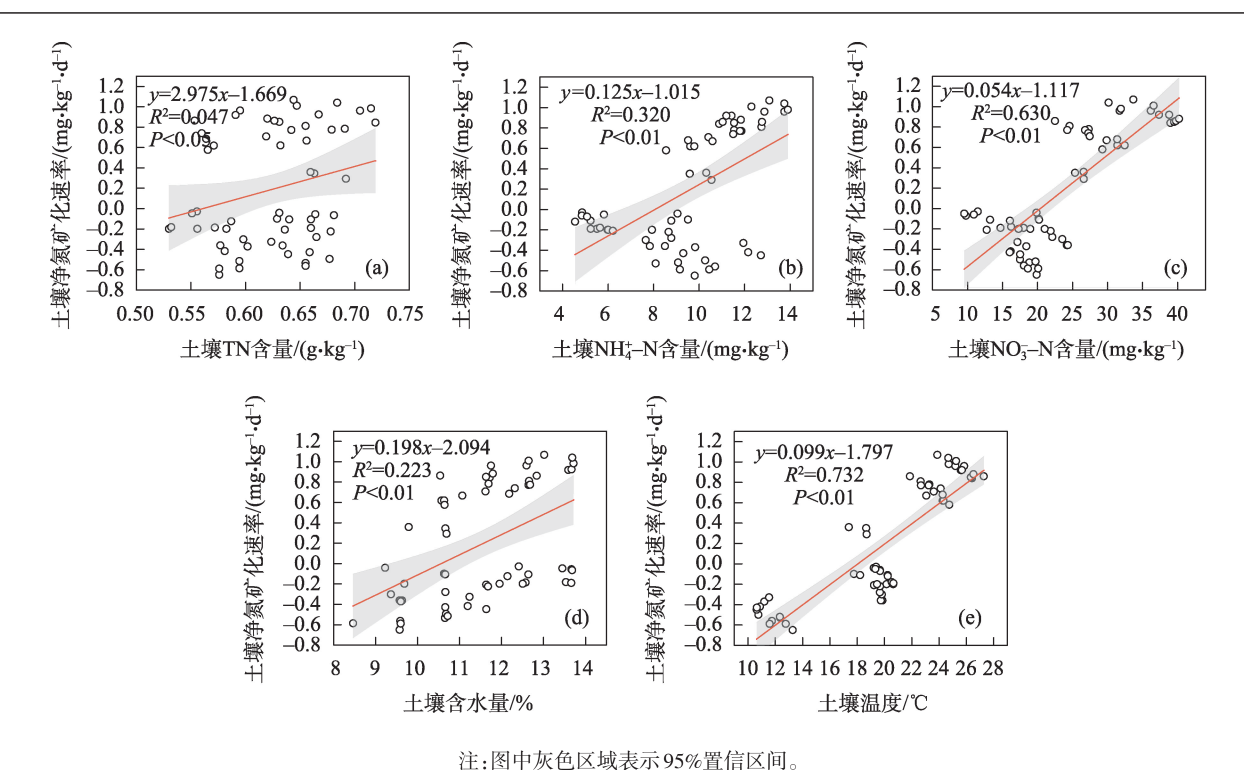
拔节期-开花期: $y=0.819-0.640x_3-0.506x_5$; $(R^2=0.839,\ P<0.05)$　(6)

开花期-灌浆期: $y=0.260+0.345x_2+0.317x_3$; $(R^2=0.914,\ P<0.05)$　(7)

灌浆期-成熟期: $y=3.476-0.633x_1-0.118x_4-0.352x_5$; $(R^2=0.855,\ P<0.01)$　(8)

式中:y为土壤净氮矿化速率;x_1为土壤温度;x_2为土壤含水量;x_3为土壤铵态氮;x_4为土壤硝态氮;x_5为土壤全氮。

对各生育期下回归模型分析可得,播种前-分蘖期土壤净氮矿化速率仅受土壤含水量影响,分蘖期-拔节期土壤净氮矿化速率受土壤温度、土壤铵态氮和土壤硝态氮影响,决定系数为0.660;拔节期-开花期土壤氮矿化速率受土壤铵态氮和土壤全氮影响,决定系数为0.839;开花期-灌浆期土壤氮矿化速率受土壤含水量和土壤铵态氮影响,决定系数为0.914;灌浆期-成熟期土壤氮矿化速率受土壤温度、土壤硝态氮和土壤全氮影响,决定系数为0.855。可见,不同培养阶段下各因子对土壤氮矿化速率会产生不同的影响。



注:图中灰色区域表示95%置信区间。

图5 春小麦全生育期内土壤净氮矿化速率与其影响因子间的关系

Fig. 5 The relationship between soil net nitrogen mineralization rate and its influencing factors during the whole growth period of spring wheat

表3 土壤净氮矿化速率与影响因子间的灰色关联度

Tab. 3 Grey correlations between net soil N mineralisation rates and influencing factors

培养阶段	灰色关联度				
	温度	土壤含水量	土壤铵态氮	土壤硝态氮	土壤全氮
播种前-分蘖期	0.820	0.704	0.633	0.822	0.730
分蘖期-拔节期	0.677	0.647	0.657	0.696	0.634
拔节期-开花期	0.668	0.627	0.704	0.715	0.642
开花期-灌浆期	0.669	0.851	0.908	0.627	0.773
灌浆期-成熟期	0.667	0.781	0.821	0.645	0.546

3 讨 论

3.1 不同耕作措施下土壤氮矿化的变化规律

土壤氮素矿化作为农田土壤生态系统氮循环的重要组成部分,对于维持土壤供氮能力、调控土壤氮素含量及其形态分布具有重要作用[18]。本研究发现,各耕作措施处理下土壤净氮矿化速率随春小麦生育期的推进均呈现前期降低、中后期升高的变化趋势,这与王凯等[19]的研究结果相似。在播前-分蘖期培养阶段各处理下土壤净氨化量、净硝化量和净氮矿化量均表现为净氮固持状态,一方面可能是由于该生育期处于春季,气温低、降雨不足,导致土壤微生物数量及活性的增长受到抑制[20],进而使土壤氮矿化速率下降;另一方面,本试验中作物秸秆于前年收获后全量还田,于此阶段开始腐解,土壤中有机碳输入得到补充,较高的土壤C∶N使得土壤微生物生长受氮素限制而处于缺氮状态,土壤微生物需要固定更多矿质氮以维持自身生长和繁殖,因此,该培养阶段土壤氮素转化表现为生物固持状态[21]。分蘖期-拔节期和拔节期-开花期培养阶段各耕作措施处理下土壤氮素矿化过程以净氨化为主,这可能是由于土壤硝铵态氮均为水溶性氮,并且该区域在春小麦分蘖期-开花期降雨强度较大,而铵态氮主要以交换态氮形式存在,易被胶体吸附,使得铵态氮不易随地表径流和下渗淋溶

损失,土壤铵态氮含量较高,土壤净氨化作用较强;土壤硝态氮作为植物速效氮与土壤溶液的重要组成部分,因其带有负电荷,导致易随地表径流流失或下渗淋溶流失,土壤硝态氮含量降低,土壤净硝化作用较弱,因此土壤氮素转化以净氨化为主[22]。开花期-灌浆期和灌浆期-成熟期培养阶段各耕作措施处理土壤净氨化量、土壤净硝化量和土壤净氮矿化量变化均呈增加趋势,原因可能是此时处于夏秋季节气温高、降雨较丰富,土壤微生物能够大量繁殖[14],因此,土壤氮矿化速率升高。本研究发现春小麦生育期内土壤净氮矿化量的变化是由土壤净硝化量的变化引起的,这可能与试验区土壤质地黄绵土为弱碱性土壤有关,弱碱性土壤中矿质氮主要存在形式为硝态氮,铵态氮含量低而稳定[16]。

3.2 不同耕作措施对土壤氮矿化过程的影响

耕作直接影响农田土壤结构与理化性质,并对土壤养分循环造成影响,进而调控土壤氮矿化过程[23]。免耕能够有效改善土壤结构,提高土壤蓄水保墒能力,使得土壤氮素矿化过程发生变化[11];秸秆覆盖可有效增加土壤有机质,并对微生物活性、生物量及细菌群落结构产生影响,导致土壤氮素矿化速率提高,增加土壤氮素有效性[12]。而免耕秸秆覆盖处理结合了两者的优点,具有改善土壤水热条件、增加土壤养分含量的作用,能够促进土壤微生物数量及多样性的提高,加强微生物活性,有利于土壤氮矿化过程的进行,满足了春小麦生长发育阶段对氮素的需求,促进春小麦的增产[24]。本研究结果发现,3种保护性耕作处理显著提高了土壤氮素含量,相比传统耕作,保护性耕作有利于均衡农田土壤养分,促进缓效养分的释放,增加土壤肥力,这与苗贺等[25]的研究结果相似,这可能是由于实施免耕对土壤的扰动影响下降,降低农田土壤养分损失[26],并且覆盖于地表的秸秆和残留在地表的作物根系残茬腐解后释放出有机质,进一步促进微生物的固氮作用,使得氮素被保留在土壤中,从而增加土壤氮素含量[27]。土壤氮素含量作为评价土壤供氮能力的重要指标,其动态变化直接影响土壤有机氮矿化速率[28]。本研究发现,土壤净氮矿化速率与土壤氮素含量的变化密切相关,随土壤氮素含量的增加,土壤净氮矿化速率也随之升高,保护性耕作处理显著增加了土壤氮素含量,从而促进了土壤净氮矿化速率。这与李光等[29]的研究结果一致,可能原因是不同保护性耕作处理使土壤有机质含量提升,而有机质作为土壤氨化、硝化细菌生长繁殖的基质,能够刺激土壤微生物产生更多的酶,使得土壤净氮矿化速率增加[30]。

土壤水热条件作为影响土壤氮矿化过程的重要环境因子,在农田生态系统中有着不可替代的作用。试验中传统耕作措施下土壤温度显著高于其他耕作处理,可能是传统耕作土壤表层无秸秆覆盖,导致土壤裸露、太阳辐射强度高[31],土壤温度较高。本研究发现,随春小麦生育期推进各耕作处理下土壤温度均升高,土壤净氮矿化速率也随之上升,这与姚晓寒等[32]的研究结果一致,原因可能与温度升高能够影响土壤微生物数量、活性和群落组成,进而促进土壤氮矿化过程。此外,也有学者发现在土壤温度适宜范围内,土壤氮矿化主要受土壤含水量的影响[33]。本研究结果表明,与传统耕作相比,3种保护性耕作显著提高了春小麦生育期内土壤含水量,原因可能是因为传统耕作下土壤结构被破坏,土层疏松、水分易蒸发;而免耕处理保留了春小麦根系残茬,配合秸秆覆盖在土壤表层形成一层保护层,降水能够更快速入渗到土壤中,减少地表径流,同时减少了因耕作和环境因素对土壤结构的破坏,有助于增加土壤团聚体,形成更稳定的土壤结构层有效降低了水分的蒸发和下渗[34]。本研究发现,春小麦生育期内土壤净氮矿化速率随土壤含水量升高而加快,这与宋良翠等[35]的研究结果一致,原因可能是适宜的水分条件有利于土壤养分的释放,使得参与土壤氮矿化作用的微生物繁殖与更新速率加快,土壤微生物群落结构及活性得以改变,从而促进土壤氮矿化速率[36]。

4 结 论

通过对旱作麦田土壤氮矿化过程的研究,为黄土高原春小麦土壤氮矿化过程对不同耕作措施的响应提供了证据。随春小麦生育期推进,不同耕作措施处理下土壤氮素均呈现前期固持、中后期矿化分解趋势,土壤氮矿化速率随培养时间的延长逐渐上升;3种保护性耕作显著提升了土壤氮矿化量和矿化速率,并在NTS处理下达到最大值,且显著增加了0~20 cm土层土壤含水量,促进了氮素吸收。土壤氮含量、土壤水热条件与土壤氮矿化速率间存

在一定的关联关系与线性关系,春小麦生育期内土壤净氮矿化速率与各因子间均有较强的关联强度,多元逐步回归模型表明在不同培养阶段参与调控土壤氮矿化的影响因子也有所差异。综上,NTS处理能够显著增加土壤氮含量,提高土壤氮矿化速率,可作为黄土高原的最优耕作措施。

参考文献(References):

[1] Devianti D, Zulfahrizal Z, Sufardi S, et al. Fast and simultaneous prediction of agricultural soil nutrients content using infrared spectroscopy[J]. Rona Teknik Pertanian, 2019, 12(1): 61–69.

[2] Hou R, Li T, Fu Q, et al. Effects of biochar and straw on greenhouse gas emission and its response mechanism in seasonally frozen farmland ecosystems[J]. Catena, 2020, 194(48): 104735.

[3] 赵秋, 田秀平, 周丽平, 等. 不同冬绿肥翻压对土壤有机氮组分和氮素矿化的影响[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 78–83. [Zhao Qiu, Tian Xiuping, Zhou Liping. et al. Effects of different winter green manures on composition and mineralization of soil organic nitrogen[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(1): 78–83.]

[4] 张磊, 孔丽丽, 侯云鹏, 等. 实现黑土玉米高产和养分高效的控释氮肥与尿素掺混比例[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(12): 2201–2213. [Zhang Lei, Kong Lili, Hou Yunpeng, et al. Optimum application ratio of controlled-release nitrogen fertilizer and urea for high maize yield and nutrient efficiency in black soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(12): 2201–2213.]

[5] 孔涛, 张莹, 雷泽勇, 等. 沙地樟子松人工林土壤氮矿化特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(2): 296–306. [Kong Tao, Zhang Ying, Lei Zeyong, et al. Soil nitrogen mineralization under *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation on sandy soil[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(2): 296–306.]

[6] 黄桥明, 黄俊, 吕茂奎, 等. 恢复年限、林下植被及季节对马尾松林土壤氮转化的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(8): 2556–2564. [Huang Qiaoming, Huang Jun, Lv Maokui, et al. Effects of restoration duration, understory vegetation and seasons on soil nitrogen transformation in *Pinus massoniana* forests[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(8): 2556–2564.]

[7] 郎漫, 许力文, 朱恺文, 等. 碳氮施加对农田黑土氮素转化和温室气体排放的影响[J]. 生态环境学报, 2023, 32(2): 235–244. [Lang Man, Xu Liwen, Zhu Kaiwen, et al. Effects of carbon and nitrogen addition on nitrogen transformation and greenhouse gas emissions from black cropland soil[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2023, 32(2): 235–244.]

[8] 牛润芝, 朱长伟, 姜桂英, 等. 豫北潮土区轮耕模式对小麦光合特性、产量及土壤养分的影响[J]. 华北农学报, 2022, 37(4): 182–189. [Niu Runzhi, Zhu Changwei, Jiang Guiying, et al. Effects of rotation tillage pattern on wheat photosynthetic characteristics, yield, and soil nutrients in Fluvo-aquic soil in north Henan [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2022, 37(4): 182–189.]

[9] 刘帅楠, 李广, 宋良翠, 等. 早播及耕作措施对黄土高原半干旱区春小麦土壤氮磷元素的影响[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1367–1375. [Liu Shuainan, Li Guang, Song Liangcui, et al. Effects of early sowing and tillage measures on nitrogen and phosphorus in the soil supporting spring wheat in the semi-arid area of Loess Plateau[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(5): 1367–1375.]

[10] 黄达, 姜玉琴, 谢先进. 免耕对土壤理化性质及作物产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(2): 9–11, 22. [Hang Da, Jiang Yuqin, Xie Xianjin. Influence of No-tillage on soil physicochemical properties and crop yield [J]. Contemporary Agricultural Machinery, 2022, 50(2): 9–11, 22.]

[11] 吴鸿宇. 耕作方式和坡度对黑土肥力特征的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022. [Wu Hongyu. Effects of Tillage Measures and Slope Gradients on Fertility of Black Soil [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2022.]

[12] 邓超超, 李玲玲, 谢军红, 等. 耕作措施对陇中旱农区土壤细菌群落的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(1): 207–216. [Deng Chaochao, Li Lingling, Xie Junhong, et al. Effects of tillage on soil bacterial community in the dryland farming area of Central Gansu[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(1): 207–216.]

[13] 李文慧, 林妍敏, 南雄雄, 等. 果树–覆盖作物可持续种植体系土壤碳氮固存及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2023, 34(2): 471–480. [Li Wenhui, Lin Yanmin, Nan Xiongxiong, et al. Soil carbon and nitrogen sequestration and associated influencing factors in a sustainable cultivation system of fruit trees intercropped with cover crops[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(2): 471–480.]

[14] 王伟, 于兴修, 刘航, 等. 农田土壤氮矿化研究进展[J]. 中国水土保持, 2016, 415(10): 67–71. [Wang Wei, Yu Xingxiu, Liu Hang, et al. Research progress on nitrogen mineralization in farmland soil [J]. Soil and Water Conservation in China, 2016, 415(10): 67–71.]

[15] 王永栋, 武均, 郭万里, 等. 秸秆和生物质炭添加对陇中黄土高原旱作农田土壤氮素矿化的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 186–192, 199. [Wang Yongdong, Wu Jun, Guo Wanli, et al. Effects of straw and biochar addition on soil nitrogen mineralization in dryland farmland of the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 186–192, 199.]

[16] 石冰洁, 李世清. 地表覆盖对旱作玉米农田土壤氮素矿化的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(4): 1–6, 14. [Shi Bingjie, Li Shiqing. Effect of surface mulching on soil nitrogen mineralization in dry farmland[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(4): 1–6, 14.]

[17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 39–69 [Lu Rukun. Agricultural Science and Technology Press[M]. Beijing: China's Agricultural Science and Technology Press, 1999: 39–69]

[18] 李平, 郎漫, 魏玮. 不同施氮量对林地和农田黑土净氮转化速率的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51(3): 694–701. [Li Ping, Lang Man, Wei Wei. Effects of nitrogen application amounts on net nitrogen

transformation rates in forest and agricultural black soils[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51 (3): 694-701.]

[19] 王凯, 刘勇, 赵蕊蕊, 等. 生物炭和有机肥对毛白杨人工林土壤氮矿化的影响[J]. 东北林业大学学报, 2022, 50(10): 61 - 68. [Wang Kai, Liu Yong, Zhao Ruirui, et al. Effects of biochar and organic fertilizer on soil nitrogen mineralization in *Populus tomentosa* plantation[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2022, 50 (10): 61-68.]

[20] 李梦, 胡容, 蒲玉琳, 等. 若尔盖不同退化程度高寒沼泽湿地土壤氮矿化特征及温度效应[J]. 草地学报, 2021, 29(5): 1025-1033. [Li Meng, Hu Rong, Pu Yulin, et al. Characteristics and temperature effect of soil nitrogen mineralization from alpine marsh wetlands with different degree in Zoige[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(5): 1025-1033.]

[21] 张丹, 付斌, 胡万里, 等. 秸秆还田提高水稻-油菜轮作土壤固氮能力及作物产量[J]. 农业工程学报, 2017, 33(9): 133-140. [Zhang Dan, Fu Bin, Hu Wanli, et al. Increasing soil nitrogen fixation capacity and crop yield of rice-rape rotation by straw returning [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(9): 133-140.]

[22] 秦昊德, 李广, 吴江琪, 等. 降雨频率变化对尕海湿草甸土壤氮组分的影响[J]. 干旱区研究, 2022, 39(4): 1191-1199. [Qin Haode, Li Guang, Wu Jiangqi, et al. Effects of rainfall frequency change on soil nitrogen components in Gahai wet meadow[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(4): 1191-1199.]

[23] 张邦彦, 李惠霞, 何进宇, 等. 粉垄耕作对宁南黑垆土氮素运移及马铃薯产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022, 59(9): 155-165. [Zhang Bangyan, Li Huixia, He Jinyu, et al. Effect of powder ridge cultivation on nitrogen transport and potato yield in dark loessial soil of Southern Ningxia[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022, 59(9): 155-165.]

[24] 王周, 李强, 焦云飞, 等. 轮耕对吉林省西部春玉米田土壤团聚体和产量的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2022, 44(6): 742-750. [Wang Zhou, Li Qiang, Jiao Yunfei, et al. Effects of rotation tillage on soil aggregates and yield of spring maize field in Western Jilin Province[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2022, 44(6): 742-750.]

[25] 苗贺, 袁磊, 杨森茵, 等. 基于^{15}N示踪的东北黑土地保护性耕作农田减氮增产调控机制[J]. 应用生态学报, 2023, 34(4): 876-882. [Miao He, Yuan Lei, Yang Miaoyin, et al. Mechanisms of conservation tillage on nitrogen-fertilizer reduction and maize grain improvement in Mollisols of Northeast China: Insights from a ^{15}N tracing study[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(4): 876-882.]

[26] Kazmierczak R B, Agnellos A E B, Balarezo F N G, et al. Mechanical Intervention in compacted No-Till soil in Southern Brazil: Soil Physical Quality and Maize Yield[J]. Agronomy, 2022, 12(10): 2281-2281.

[27] 刘平东. 水稻、油菜还田秸秆氮素释放与吸附特征[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018. [Liu Pingdong. Nitrogen Release and Adsorption Characteristics of Rice and Rape Straw[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018.]

[28] 左倩倩, 王邵军, 王平, 等. 蚂蚁筑巢对西双版纳热带森林土壤有机氮矿化的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(18): 7339-7347. [Zuo Qianqian, Wang Shaojun, Wang Ping, et al. Effects of ant colonization on soil organic nitrogen mineralization in the Xishuangbanna tropical forest[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(18): 7339-7347.]

[29] 李光, 史丽娟, 崔旭东, 等. 耕作方式对连作高粱产量及土壤水分与有机碳含量的影响[J]. 华北农学报, 2023, 38(2): 170-178. [Li Guang, Shi Lijuan, Cui Xudong, et al. Effect of tillage methods on yield and soil water and organic carbon content of continuous cropping sorghum[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2023, 38 (2): 170-178.]

[30] 卢志红, 魏宗强, 杨敏, 等. 有机物料添加磷素释放动态与土壤磷组分响应[J]. 江西农业大学学报, 2022, 44(6): 1582-1591. [Lu Zhihong, Wei Zongqiang, Yang Min, et al. Phosphorus release dynamics of organic amendments and soil phosphorus fractions response[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2022, 44 (6): 1582-1591.]

[31] Jarrah Mahboube, Mayel Sonia, Franko Uwe, et al. Effects of agricultural management practices on the temporal variability of soil temperature under different crop rotations in bad Lauchstaedt-Germany[J]. Agronomy, 2022, 12(5): 1199.

[32] 姚晓寒, 陈祎, 韩雪, 等. 农业开垦对泥炭沼泽湿地土壤氮矿化的影响[J]. 环境生态学, 2021, 3(7): 1-10. [Yao Xiaohan, Chen Yi, Han Xue, et al. Effects of agricultural reclamation on soil nitrogen mineralization in peatland[J]. Environmental Ecology, 2021, 3 (7): 1-10.]

[33] Kebede Laike, Temesgen Melesse, Fanta Abebe, et al. Effect of locally adapted conservation tillage on runoff, soil erosion, and agronomic performance in semiarid rain-fed farming in Ethiopia[J]. Land, 2023, 12(3): 593.

[34] 祁小平, 李广, 袁建钰, 等. 保护性耕作对陇中旱作麦田蓄水保墒效果和产量的影响[J]. 干旱区研究, 2022, 39(1): 312-321. [Qi Xiaoping, Li Guang, Yuan Jianyu, et al. Effects of conservation tillage on the water storage, moisture conservation, and yield of dry-land wheat fields of central Gansu Province[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(1): 312-321.]

[35] 宋良翠, 马维伟, 李广, 等. 水分对尕海湿地退化演替土壤氮矿化的影响[J]. 干旱区研究, 2022, 39(1): 165-175. [Song Liangcui, Ma Weiwei, Li Guang, et al. Effect of water on nitrogen mineralization in degraded succession of Gahai Wetland[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(1): 165-175.]

[36] Lu T, Wang Y, Zhu H, et al. Drying-wetting cycles consistently increase net nitrogen mineralization in 25 agricultural soils across intensity and number of drying-wetting cycles[J]. Science of the Total Environment, 2020, 710(C): 135574.

Effects of conservation tillage on soil nitrogen mineralization in dry wheat fields on the Loess Plateau

PANG Ye, YUAN Jianyu, YAN Lijuan, DU Mengyin, LI Guang
(College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: Soil nitrogen mineralization is an important process in the nitrogen cycle of terrestrial ecosystems and is vital for maintaining soil nitrogen supply capacity and crop growth. The semiarid region of the Loess Plateau in central Gansu is an important grain production area in Northwest China, and realizing efficient nitrogen utilization in local dry farmland is a key research focus. However, little is known about the effects of different tillage measures on soil nitrogen mineralization in dry wheat fields in this region. Therefore, this study focuses on the dryland wheat fields in the Loess Plateau and uses the resin core in situ culture method to monitor the effects of different tillage measures [traditional tillage (T), no-tillage (NT), traditional tillage + straw mulching (TS), and no-tillage+straw mulching (NTS)] on soil nitrogen mineralization during the spring wheat growth period (March-August) in 2021. This study analyzes the effects of these tillage measures on soil nitrogen content and hydrothermal conditions to understand their impact on the soil nitrogen mineralization process. The results indicate the following: (1) Soil nitrogen under T, NT, TS, and NTS treatments showed a net nitrogen fixation state during the early stage of spring wheat growth (presowing-flowering stage) and a net nitrogen mineralization state during the middle and late stages (flowering-maturity stage). There were significant differences in the soil net nitrogen mineralization rate under different tillage measures (NTS>TS>NT>T). (2) Compared with the T treatment, three conservation tillage methods increased soil total nitrogen, NH_4^+-N content, and moisture during the growth period of spring wheat while reducing soil NO_3^--N content and temperature accumulation. (3) The correlation analysis showed that soil nitrogen content and soil water and heat were the key factors affecting the soil net nitrogen mineralization rate. However, the influencing factors regulating soil nitrogen mineralization at different incubation stages varied. In conclusion, NTS treatment promotes soil nitrogen mineralization, improves soil nitrogen supply and water retention capacity, and is crucial for maintaining and restoring farmland productivity in the semiarid region of the Loess Plateau.

Keywords: spring wheat field; conservation tillage; soil nitrogen mineralization; soil nitrogen components; soil water heat